
IMAGE RESTORATION TECHNIQUES USING MAXWELL BOLTZMANN DISTRIBUTION

Yulianto Agung Rezeki*, Nurul Azizah, Raga Patmita Roro Febriani, Rania
Milenia, Rendi Aldona Fajar

¹Program Studi Pendidikan Fisika, Universitas Sebelas Maret, Indonesia
E-mail: yarezeki@staff.uns.ac.id

ABSTRACT

Image restoration technology has many functions and roles in various fields. With the image restoration technology, it is easy for human to describe something through the displayed pictures. However, in practice there are many shortcomings, one of which is the amount of noise and the resulting image is not clear. Therefore, the image restoration method is a solution that can be used to solve this problem. With image restoration, the image that have been previously produced can be modified so that the results are clearer. Maxwell Boltzmann distribution plays a very important role in supporting this image restoration method. The applications in Maxwell Boltzmann we will discuss in here are image restoration filters with Simulated Annealing in magnitude image restoration, modelling in adaptive spatial image restoration, and endoscopic image restoration. In conclusion, image technology can be found in various fields and with different technologies.

Keyword: filter, image restoration, kernel, Maxwell Boltzmann

TEKNIK RESTORASI CITRA MENGGUNAKAN DISTRIBUSI MAXWELL BOLTZMANN

ABSTRAK

Teknologi restorasi citra memiliki banyak fungsi dan peran di berbagai bidang. Dengan adanya teknologi restorasi citra, manusia dapat dengan mudah untuk mendeskripsikan sesuatu hal melalui citra yang ditampilkan. Namun, dalam prakteknya banyak kekurangan, salah satunya adalah banyaknya *noise* dan tidak jernihnya citra yang dihasilkan. Oleh karena itu, metode restorasi citra menjadi solusi alternatif yang dapat digunakan untuk mengatasi hal tersebut. Dengan restorasi citra, citra awal yang telah dihasilkan sebelumnya dapat dimodifikasi sehingga hasilnya menjadi lebih jernih. Distribusi *Maxwell Boltzmann* sangat berperan dalam mendukung metode restorasi citra ini. Penerapan *Maxwell Boltzmann* yang akan dibahas di sini yaitu restorasi citra pada dengan *Simulated Annealing* dalam restorasi citra *magnitude*, pemodelan dalam restorasi citra spasial adaptif, restorasi citra endoskopi. Kesimpulannya adalah teknologi citra dapat ditemukan diberbagai bidang serta dengan teknologi yang berbeda-beda.

Kata kunci: filter, restorasi citra, kernel, Maxwell Boltzmann

PENDAHULUAN

Masalah yang kerap muncul dalam proses restorasi adalah munculnya *noise*. Kemunculan *noise* ini dapat menyebabkan nilai pixel menjadi turun. Selain kemunculan *noise*, terdapat juga beberapa permasalahan pada restorasi citra seperti citra terlalu gelap atau terang, citra kurang tajam, *blur*, dll (Afiyat, 2017). Harus ditemukan cara yang efektif agar pengamat tidak terkecoh dengan hasil restorasi citra yang terdegradasi. Solusi yang bisa dilakukan untuk mewujudkan citra dalam tampilan yang jernih yang banyak dilakukan salah satunya adalah proses restorasi citra. Restorasi citra dikenal sebagai teknik untuk merekonstruksi citra yang sebelumnya terdegradasi sehingga dapat menyerupai citra aslinya (Erwin, 2019). Citra yang terdegradasi sebetulnya dapat diolah melalui proses yang konvensional yaitu menggunakan *filter* linear dan *filter* non linear. Filter linear contohnya *high pass filter* dan *low pass filter*, sedangkan *filter* non linear contohnya *median filter*. Proses konvensional tersebut hanya bisa digunakan apabila *noise* pada citra muncul karena faktor derajat keabuan (*gray-level*), akan tetapi jika citra mengalami *noise* yang muncul secara acak maka metode konvensional tersebut tidak bisa digunakan. Penyebab munculnya *noise* pada citra bisa dikarenakan dari karakteristik derajat keabuan (*gray-level*), ataupun karena adanya variabel acak yang terjadi karena karakteristik *Probability Density Function* (PDF) (Wedianto et al., 2016). Dalam hal inilah, peran statistika untuk menghitung peluang yang datang secara acak diperlukan sebagai solusi. Begitu juga halnya dengan

permasalahan *noise* yang muncul secara acak. Hal tersebut tentunya bisa diselesaikan dengan cara mekanika statistik..

Mekanika statistik adalah salah satu metode yang dapat memperlakukan citra secara konsisten. Metode ini memproses informasi citra secara probabilistik. Pada mekanika statistik terdapat beberapa fungsi distribusi, salah satunya adalah distribusi *Maxwell Boltzmann* yang berlaku untuk partikel identik tetapi terbedakan. Secara khusus dalam mekanika statistik, distribusi *Maxwell Boltzmann* merupakan distribusi yang digunakan untuk menggambarkan kecepatan partikel gas yang bergerak bebas antara tumbukan kecil tetapi berinteraksi satu sama lain dan dipengaruhi oleh temperatur sistem, massa partikel, dan kecepatan partikel (Pratomo, 2013). *Noise* yang bersifat acak pada citra dapat diselesaikan dengan distribusi *Maxwell Boltzmann* dengan pengaturan temperaturnya. Pada artikel ini akan dibahas teknik restorasi citra menggunakan distribusi *Maxwell Boltzmann*.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penulisan artikel ini adalah *literature review*. Artikel-artikel yang berhubungan dengan teknik restorasi citra menggunakan distribusi *Maxwell Boltzmann* disusun dan dijadikan sebagai rujukan dalam penulisan artikel.

HASIL DAN PEMBAHASAN

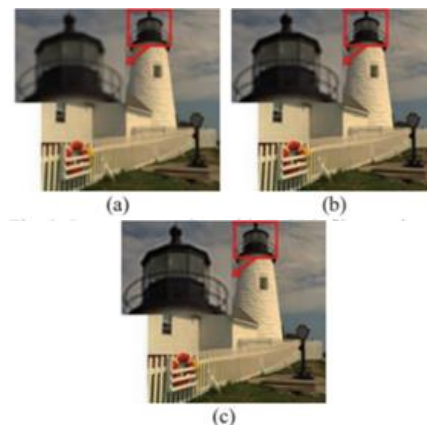
1. Pemanfaatan kernel distribusi *Maxwell Boltzmann* dalam Permodelan Restorasi Citra Spasial Adaptif

Cho dkk. pada tahun 2014 telah melakukan eksperimen untuk membuktikan apakah metode yang disulkannya akan memunculkan detail yang lebih jelas. Metode desain yang digunakan pada pemodelan eksperimen restorasi citra spasial adaptif ini adalah FIR (*Finite Impulse Response*) filter, spesifiknya filter ini memotong filter kuadrat terkecil restorasi citra yang dibatasi atau biasa disebut *Constrained Least Squares* (CLS) yang asli untuk menghasilkan real time restorasi citra spasial adaptif (Cho et al., 2014). Filter kuadrat terkecil itu sendiri dalam restorasi citra merupakan penggunaan persamaan integral mengestimasi fungsi linear dari sebuah data dan meminimalkan kesalahan kuadrat rata-rata antara solusi sebenarnya dan solusi itu sendiri (Helstrom, 1967). Filter CLS dipotong oleh beberapa *kernel* untuk mengurangi kehabisan energi di tengah-tengah dan untuk menghaluskan sekeliling filter atau biasa disebut *Truncated Constrained Least Squares* (T-CLS).

Kernel sendiri merupakan inti dari sistem pengoperasian yang berfungsi untuk mengendalikan dan mengolah kerja sistem *hardware* pada komputer (Wamiliana et al., 2013). Pada pemodelan yang biasanya, dilakukan menggunakan *kernel* Gaussian ataupun *kernel* Cosinus. Masing-masing *kernel* Gaussian dan *kernel* Cosinus memiliki kekurangan dan kelebihan. *Kernel* Gaussian akan lebih cenderung mengalami kehilangan energi di tengah-tengah, akan tetapi *kernel* Gaussian memiliki pemotongan yang lebih halus di sekitar filter karena adanya artefak dering yang lebih rendah. Adapun *kernel* Cosinus memiliki dering yang

lebih tinggi sehingga pemotongan di sekitar filter nya kurang halus, tetapi lebih kecil kemungkinan untuk kehilangan energi di tengah-tengah (Kim et al., 2009). Dalam pemodelan FIR filter di sini digunakan *kernel* distribusi *Maxwell Boltzmann* yang jauh lebih unggul daripada *kernel* Gaussian maupun *kernel* Cosinus.

Gambar 1 merupakan hasil percobaan restorasi citra menggunakan *kernel* Gaussian, *kernel* Cosinus, dan *kernel* yang diusulkan dari pemodelan menggunakan distribusi *Maxwell Boltzmann*. Pada eksperimen tersebut, digunakan filter T-CLS yang berukuran 13×13 , dan standar deviasi dari fungsi penyebaran titik distribusi Gaussian sebesar 1,5.



Gambar 1. Gambar restorasi dengan filter T-CLS dengan menggunakan (a) *Kernel* Gaussian, (b) *kernel* Cosine, dan (c) *kernel* yang diusulkan

Dalam eksperimen ini, citra yang asli didegradasi dengan fungsi penyebaran titik distribusi Gaussian untuk menunjukkan bahwa metode yang diusulkan lebih kompatibel untuk perestorasi citra. *Kernel* distribusi *Maxwell Boltzmann* dalam penelitian ini memotong filter CLS dengan tujuan

mempertahankan satu set lobus utama dari filter CLS asli yang diberikan dukungan filter terbatas.

2. Pemanfaatan *Maxwell Boltzmann* dalam Restorasi Citra Endoskopi

Endoskopi merupakan salah satu teknik yang sering digunakan pada dunia medis untuk melihat secara langsung kondisi di dalam saluran pencernaan menggunakan alat yang bernama endoskop (Kaminang et al., 2016). Endoskopi sering digunakan untuk memeriksa sistem pencernaan seseorang dan merupakan tindakan non bedah. Ada tiga bagian utama dari prosedur endoskopi, yang pertama yaitu, *Sigmoidoscopy*, *Colonoscopy*, dan *Upper GI (Gastro Intestinal)*. Prosedur *Sigmoidoscopy* digunakan untuk menentukan rektum dan bagian bawah usus (usus besar), sedangkan prosedur *Colonoscopy* digunakan untuk memeriksa pada bagian seluruh usus besar (usus) dan bagian bawah usus kecil, sedangkan untuk lapisan sistem GI atas diperiksa dengan menggunakan prosedur *Upper GI* (Trambadia & Mayatra, 2016).

Citra yang dihasilkan dari pemeriksaan menggunakan endoskopi terdapat banyak *noise* karena kurangnya pencahayaan pada saat pengambilan citra, dan juga peningkatan *noise* ini disebabkan oleh lensa yang terdegradasi dalam instrumen endoskopi serta disebabkan oleh kurang fokusnya kamera pada alat endoskop (Bonaccorsi et al., 2020).

Itulah sebabnya (Trambadia & Mayatra, 2016) telah merancang filter T-CLS (*Truncated Constrained Least Squares*) dengan *kernel* distribusi *Maxwell*

Boltzmann dalam domain frekuensi dan hibridisasi dengan algoritma SURE-LET untuk pemulihan yang efektif dari citra endoskopi yang terdegradasi. Filter T-CLS berhasil mengurangi degradasi dan algoritma SURE-LET dan mengurangi *noise* acak pada citra endoskopi. Metode yang diusulkan tersebut menggunakan *kernel* distribusi *Maxwell Boltzmann* yang dapat mengatasi keterbatasan *kernel* konvensional.

Percobaan ini menunjukkan keunggulan dari metode yang diusulkan dibandingkan dengan metode tradisional T-CLS filter. Jenis citra endoskopi yang berbeda didegradasi oleh tingkat ekstrim yang lebih tinggi dari dimensi topeng blur 70 dan *noise* acak (*White noise*) level 0,001. Gradien lereng σ dan nilai median kemiringan d dalam *kernel* distribusi *Maxwell Boltzmann* masing-masing di-setting pada 1000 dan 7 yang memberikan hasil terbaik untuk citra endoskopi.

Perbedaan citra endoskopi dengan prosedur *Sigmoidoscopy*, *Colonoscopy* dan *Upper GI* terdegradasi dengan jumlah penutup buram dimensi 70 dan intensitas *noise* acak 0,001 untuk memvalidasi metode yang diusulkan memberikan hasil yang lebih baik dalam ketentuan parameter PSNR, MSE dan SSIM dibandingkan dengan metode konvensional (Kim et al., 2009).

Parameter PSNR (*Peak signal to noise ratio*) adalah salah satu parameter yang sangat umum di dalam bidang kompresi sebuah data yang digunakan untuk memahami citra konstruksi dengan citra aslinya. Pada parameter ini menggunakan persamaan galat

terkuadrat rerata atau MSE (Mean Squared Error). Jika galat antara citra terkonstruksi dengan citra asli maka akan semakin mengecil dan sebaliknya PSNR akan bertambah besar.

$$PSNR = 10 \log \frac{255^2}{\sigma_e^2}$$

Dimana σ adalah galat terkuadrat rerata (MSE) yang diberikan oleh:

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (x_{i,j} - \hat{x}_{i,j})^2$$

Dimana $x[.]$ adalah citra asli dengan dimensinya adalah $M \times N$ dan $\hat{x}[.]$ adalah citra terkonstruksi. PSNR yang jauh lebih besar akan dapat menghasilkan kualitas citra yang juga jauh lebih baik. (Sianipar et al., n.d.)

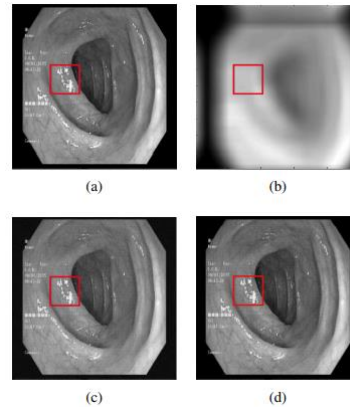
Sedangkan untuk parameter SSIM (Structural Similarity) sering digunakan pada pengukuran kualitas citra yang didasarkan dari pengukuran degradasi kualitas dari suatu citra *input* yang juga bisa dijadikan sebagai nilai akurasi.

$$SSIM_{(x,y)} = \frac{(2\mu_x\mu_y)(2\sigma_{xy} + c2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c2)}$$

Dari persamaan SSIM diatas menjelaskan bahwa μ_x adalah nilai dari rata-rata gambar x dan μ_y gambar y dan σ_x^2 merupakan nilai variansi yang ada pada gambar x, Selanjutnya σ_y^2 adalah nilai variansi gambar y, dan yang terakhir σ_{xy} yaitu nilai dari kovarian pada gambar x dan y. (Santosa et al., 2021)

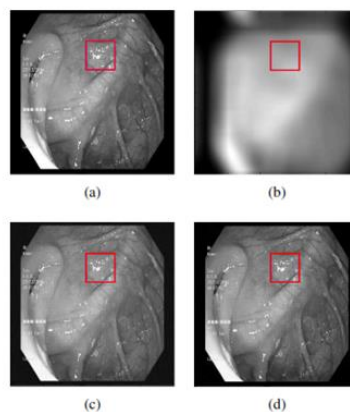
Pada Gambar 2, bagian yang disoroti adalah pembuluh darah vena tipis. Ini ada kemungkinan untuk tidak dapat terlihat atau tersembunyi apabila dipengaruhi oleh degradasi. Degradasi disini seperti yang diamati pada gambar

uji. Filter T-CLS dengan *kernel* distribusi *Maxwell Boltzmann* mampu memulihkan citra yang terdegradasi untuk sebagian besar bagian, akan tetapi pada pembuluh darah vena tipis tidak dapat dipulihkan secara efektif.



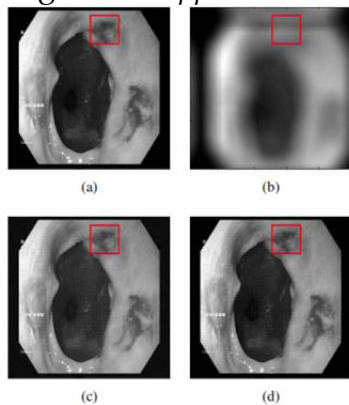
Gambar 2. (Gambar Sigmoidoscopy). (a) Gambar Asli, (b) Gambar yang terdegradasi dengan 70 dimensi yang buram dan intensitas random noise (c) T-CLS filter dengan kernel distribusi Maxwell Boltzmann [2] dan (d) Metode yang diusulkan.

Pada Gambar 3, bagian yang disoroti menunjukkan refleksi yang disebabkan oleh jaringan lembab. Terkadang refleksi memperlihatkan posisi dari tukak lambung pada citra endoskopi. Dikarenakan adanya degradasi, refleksi dapat menyembunyikan dan mengusulkan metode dipulihkan secara efektif dibandingkan dengan metode konvensional.



Gambar 3. (Gambar Colonoscopy). (a) gambar asli, (b) Gambar yang terdegradasi dengan 70 dimensi yang buram dan intensitas random noise, (c) T-CLS filter dengan kernel distribusi Maxwell Boltzmann [2] dan (d) Metode yang diusulkan.

Pada Gambar 4, hal yang disoroti adalah pada bagian kerongkongan yang menuju ke maag. Dikarenakan jumlahnya yang besar mungkin saja degradasi dari maag tidak terlihat atau tersembunyi. Metode konvensional menghasilkan efek halo (penghalusan tepi yang tidak diinginkan) di posisi maag dan ukuran akurat tidak dapat ditentukan dengan metode konvensional. Sedangkan metode yang diusulkan secara efektif memulihkan degradasi citra dan mengembalikan efek halo yang sebagian besar terlihat dari hasil gambar *Upper GI* di atas.



Gambar 4. (Gambar *Upper GI*). (a) gambar asli, (b) Gambar yang terdegradasi dengan 70 dimensi yang buram dan intensitas random, (c) T-CLS filter dengan kernel distribusi Maxwell Boltzmann [2] dan (d) Metode yang diusulkan

3. Pemanfaatan Distribusi Maxwell Boltzmann dan Simulated Annealing dalam Restorasi Citra Magnitude

Sebelumnya telah dikembangkan sebuah metode untuk restorasi citra

pada citra *grayscale* yaitu menggunakan distribusi *posterior*. Distribusi *posterior* merupakan penggabungan dari distribusi sampel dan distribusi prior melalui metode Bayes (Hazhiah et al., 2012). Metode Bayes sendiri adalah metode yang digunakan untuk pengambilan keputusan yang membutuhkan informasi dalam bentuk kemungkinan untuk setiap pilihan yang ada pada kasus yang kemudian dapat memberikan nilai harapan sebagai dasar pengambilan keputusan (Matematika, 2014). Dari metode tersebut, Adi dkk. pada tahun 2017 mengusulkan sebuah metode untuk restorasi citra menggunakan distribusi *Maxwell Boltzmann* sebagai probabilitas energi dari tiap piksel dan juga menggunakan *Simulated Annealing* (SA) untuk penjadwalan suhu pada citra terdegradasi. Dengan metode SA, parameter suhu akan berfungsi menjadi sebuah kontrol. Pada awal proses SA suhu akan di-*setting* tinggi, kemudian nilai fungsi yang mengevaluasi seberapa optimal solusi sementara yang telah diperoleh akan mengalami modifikasi. Modifikasinya sendiri bersifat bebas, jika hasil evaluasi dari nilai fungsinya mengecil maka solusi hasil modifikasi ini akan digunakan sebagai solusi selanjutnya. Jika hasil evaluasi dari nilai fungsinya masih tetap tinggi saat *temperature annealing* maka solusi yang lebih buruk ini juga masih mungkin untuk diterima. Tahapan selanjutnya pada SA adalah penurunan *temperature* secara perlahan, dengan begitu probabilitas untuk menerima langkah modifikasi yang tidak memperbaiki nilai fungsi evaluasi semakin sedikit, sampai akhirnya ditemukan solusi akhir yang paling optimal (Firdaus et al., 2015).

Teknik pengaplikasian distribusi *Maxwell Boltzmann* dan SA pada restorasi citra di sini diawali dengan membangun sebuah rantai *Markov*. Kemudian rantai *Markov* yang terdiri dari citra dengan distribusi *Maxwell Boltzmann*, temperaturnya diatur mulai dengan instalasi citra awal f_0 (f sebagai notasi dari citra digital). Rantai *Markov* sendiri merupakan suatu model yang menggambarkan dan menganalisa kealamian suatu perubahan diakibatkan oleh perubahan yang diakibatkan oleh pergerakan dari satu tempat ke tempat lain dan juga dari satu *state* (besarnya suatu kelas/kelompok) ke *state* lain (Aidi, 2008). Adapun sistematisasi pengaplikasian *Maxwell Boltzmann* dan SA pada restorasi citra digital ini yaitu:

- a. Menghitung distribusi *Maxwell Boltzmann* dari citra f_k , kemudian ditandai dengan Pr_k . Adapun persamaannya diberikan oleh persamaan.

$$Pr_k = \frac{1}{Z} e^{-E_k/kT}$$

- b. Memilih piksel secara acak dari citra tersebut
- c. Menghitung distribusi dari *Maxwell Boltzmann* pada piksel citra sampel (f_t) dan ditandai dengan Pr_t . Adapun persamaannya diberikan oleh persamaan

$$Pr_t = \frac{1}{Z} e^{-E_t/kT}$$

- d. Menerima piksel dari citra sampel dengan probabilitas p yang diberikan oleh persamaan

$$p = \min\left(1, \frac{Pr_i}{Pr_1}\right)$$

dengan

E_k = energi piksel pada citra f_k

E_t = energi piksel pada citra f_t

k = konstanta *Boltzmann*

T = temperature

Z = fungsi partisi

Untuk rasio probabilitas Pr_k/Pr_t diberikan oleh persamaan

$$\begin{aligned} \frac{Pr_k}{Pr_t} &= \frac{\frac{1}{Z} e^{-\frac{E_k}{kT}}}{\frac{1}{Z} e^{-\frac{E_t}{kT}}} \\ &= e^{-(E_k - E_t)/kT} \\ &= e^{-\Delta E/kT} \end{aligned}$$

Restorasi citra menggunakan metode distribusi *Maxwell Boltzmann* dan *Simulated Annealing* disimulasikan menggunakan algoritma *Metropolis Hastings Markov Chain Monte Carlo* (MHMCMC). Pada dasarnya algoritma *Metropolis Hastings* merupakan formula umum untuk semua penggunaan metode *Markov Chain Monte Carlo*. Adapun metode *Markov Chain Monte Carlo* sendiri adalah suatu rangkaian untuk menciptakan barisan sampel acak yang berasal dari distribusi probabilitas, dengan membangun rantai *Markov* sesuai dengan distribusi tertentu yang diharapkan. Berikut ini penjabaran algoritma *Metropolis Hastings* dengan menggunakan langkah-langkah iterasi, dimana $x^{(t)}$ adalah vektor dari nilai-nilai yang dibangkitkan di iterasi ke- t dari algoritma:

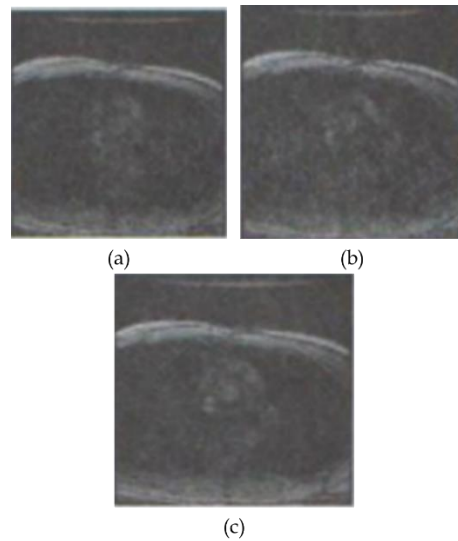
- a. Mengatur nilai awal $x^{(0)}$
- b. Untuk $t = 1, \dots, T$
 - 1) mengatur nilai $x = x^{(t-1)}$
 - 2) membangkitkan calon nilai baru x' dari distribusi proposal $q(x \rightarrow x') = q(x' | x)$
 - 3) menghitung $\alpha = \min(1, (f(x')q(x | x')) / (f(x)q(x' | x)))$ dan membangkitkan sampel acak $u \sim U(0,1)$

- 4) memperbaharui $x^{(t)} = x'$ dengan probabilitas penerimaan α dan $x^{(t)} = x^{(t-1)}$ dengan probabilitas $1-\alpha$. Jika $u \leq \alpha$ maka x' diterima sebagai anggota sampel dan jika $u > \alpha$ maka nilai sebelumnya (x) yang akan diterima sebagai anggota sampel. (Irawanti et al., 2012)

Adapun algoritma dari MHMC dapat dijabarkan sebagai berikut:

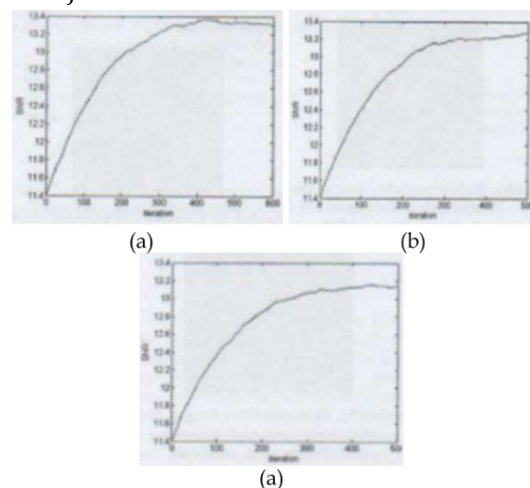
- Menginisialisasi *temperature* awal T dan inisialisasi citra $f_0 = g_1 f_k = f_0$
- Mengacak nilai *threshold* dan tandai dengan f_t
- Menghitung persamaan 1
- Menghitung persamaan 2
- Menghitung perbandingan probabilitas untuk penolakan dan penerimaan dengan persamaan 4
- Jika perbandingan probabilitas < 1 , maka piksel citra sampel diterima dengan $f_1 = f_t$, atau $f_1 = f_0$
- Mengambil f_1 sebagai piksel citra sampel f_k
- Kembali mengacak nilai *threshold* dengan ditandai f_t

Gambar 5 merupakan hasil restorasi citra digital menggunakan pendekatan distribusi *Maxwell Boltzmann* dan *Simulated Annealing* yang diimplementasikan pada citra magnitude.



Gambar 5. Restorasi citra dengan model distribusi *Maxwell Boltzmann* pada *temperature* awal (a) 1,18, (b) 2,60, dan (c) 4,40.

Proses update piksel dengan menggunakan metode distribusi *Maxwell Boltzmann* dan *Simulated Annealing* dapat dikatakan berjalan dengan baik apabila piksel yang di-update akan semakin berkurang seiring bertambahnya iterasi. Hal ini dapat ditunjukkan dari Gambar 6.



Gambar 6. Grafik SNR vs iterasi pada *temperature* awal (a) 1,18, (b) 2,60, dan (c) 4,40.

Proses update piksel masih belum dapat dikatakan dengan baik menurut grafik pada Gambar 5 karena masih banyak piksel-piksel yang belum terupdate. Hal tersebut disebabkan karena sifat dari *noise* Gaussian yang menambahkan nilai hampir semua piksel dan proses penurunan energi dari piksel-piksel sudah mencapai titik jenuh. Masih diperlukan pengembangan algoritma dari keseluruhan proses restorasi citra agar memberikan hasil yang lebih optimal.

KESIMPULAN

Dari beberapa pembahasan dapat disimpulkan bahwa penggunaan *Maxwell Boltzmann* dalam teknologi restorasi citra sangatlah luas. Metode yang digunakan dalam restorasi citra serta jenis-jenis citra pun sangat beragam.

Pada pembahasan pertama, pemanfaatan *Maxwell Boltzmann* digunakan spesifik pada jenis *kernel*. Jenis citra yang dibahas adalah citra yang diambil menggunakan kamera untuk mencetak panorama alam. Metode yang digunakan pada pembahasan tersebut berupa eksperimen dengan membandingkan *kernel* Gaussian, cosinus, dan *Maxwell Boltzmann*. Terbukti bahwa hasil citra yang menggunakan *kernel Maxwell Boltzmann* yang paling jernih.

Pada pembahasan kedua, pemanfaatan *Maxwell Boltzmann* juga masih digunakan spesifik pada jenis *kernel*. Pengaplikasiannya sendiri digunakan dalam bidang medis, yaitu pada pencitraan endoskopi. Menggunakan teknik filter T-CLS (*Truncated*

Constrained Least Squares) dengan *kernel* distribusi *Maxwell Boltzmann* dalam domain frekuensi dan hibridisasi dengan algoritma SURE-LET, penelitian tersebut berusaha membuat restorasi citra endoskopi agar lebih optimal.

Pada pembahasan terakhir, muncul lagi pengaplikasian *Maxwell Boltzmann* dalam bidang medis. Sebetulnya pengaplikasiannya di sini pada alat yang bernama MRI (*Magnetic Resonance Imaging*). Oleh karena itu, pada pembahasannya spesifik ditajamkan tentang penggunaan distribusi *Maxwell Boltzmann* untuk restorasi citra "*magnitude*". Untuk teknik yang digunakan, distribusi *Maxwell Boltzmann* disini dikombinasikan dengan teknik *Simulated Annealing*. Sama seperti pembahasan sebelumnya, terdapat algoritma yang disusun dalam teknik restorasi citra *magnitude* ini. Algoritma yang dikembangkan di sini menggunakan formula *Metropolis Hastings Markov Chain Monte Carlo* (MHMCMC). Terbukti bahwa sering bertambahnya iterasi pada algoritma yang diusulkan tersebut dapat meng-update piksel pada citra *magnitude*.

DAFTAR PUSTAKA

- Afiyat, N. (2017). Analisis Restorasi Citra Kabur Algoritma Wiener Menggunakan Indeks Kualitas Citra. *NJCA (Nusantara Journal of Computers and Its Applications)*, 2(1).
- Aidi, M. N. (2008). Penggunaan Rantai Markov Untuk Analisis Spasial Serta Modifikasinya Dari Sistem Tertutup Ke Sistem Terbuka. *Forum Statistika Dan Komputasi*, 13(1), 23-33.
- Bonaccorsi, G., Pierri, F., Cinelli, M., Flori, A., Galeazzi, A., Porcelli, F., Schmidt, A. L., Valensise, C. M., Scala, A.,

- Quattrociochi, W., & Pammolli, F. (2020). Economic and social consequences of human mobility restrictions under COVID-19. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(27), 15530–15535.
- Cho, C., Jeon, J., & Paik, J. (2014). Real-time spatially adaptive image restoration using truncated constrained least squares filter. *Digest of Technical Papers - IEEE International Conference on Consumer Electronics, January*, 256–257.
- Erwin. (2019). Membandingkan Metode Iteratif Lanczos Hybrid Regularization Dan Image Inpainting Untuk Restorasi Image Citra Bayangan. *Jurnal Pelita Informatika*, 8(1), 1–4.
- Firdaus, M., Masudin, I., & Utama, D. M. (2015). Penjadwalan Flowshop Dengan Menggunakan Simulated Annealing. *Spektrum Industri*, 13(1), 27.
- Hazhiah, I. T., Sugito, S., & Rahmawati, R. (2012). Estimasi Parameter Distribusi Weibull Dua Parameter Menggunakan Metode Bayes. *Media Statistika*, 5(1), 103–112.
- Helstrom, C. W. (1967). Image Restoration by the Method of Least Squares. *Journal of the Optical Society of America*, 57(3), 297.
- Irawanti, L. K., Mukid, M. A., & Rahmawati, R. (2012). Pembangunan Sampel Random Menggunakan Algoritma Metropolis-Hastings. *Jurnal Gaussian*, 1, 135–146.
- Kaminang, G. A., Waleleng, B. J., & Polii, E. B. (2016). Profil endoskopi gastrointestinal di RSUP Prof. Dr. R. D. Kandou Manado periode Januari 2016 – Agustus 2016. *E-CliniC*, 4(2).
- Kim, S., Jun, S., Lee, E., Shin, J., & Paik, J. (2009). Real-time bayer-domain image restoration for an extended depth of field (EDoF) camera. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 55(4), 1756–1764.
- Matematika, S. (2014). *METODE BAYES PADA EKSPEKTASI Selvira Lestari Siregar, Suwarno Ariswoyo, Pasukat Sembiring*. 2(1), 47–54.
- Pratomo, H. (2013). Teori Kinetik Gas Dan Distribusi Kecepatan Molekul. *Modul*, 1–35.
- Santosa, P. Y., Rachmawati, E., Agung, T., & Wirayuda, B. (2021). Translasi Citra Malam Menjadi Siang Menggunakan Deep Convolutional Generative Adversarial Network. *EProceedings of Engineering*, 8(1).
- Sianipar, R. H., Wj, S. M., Elektro, T., & Mataram, U. (n.d.). *Kompresi citra digital berbasis wavelet :Tinjauan PSNR dan Laju Bit Rismon H Sianipar, Sri Muliani WJ*. 81–87.
- Trambadia, S., & Mayatra, H. (2016). Endoscopic image restoration using truncated constrained least squares filter in frequency-domain and SURE-LET filter. *NUiCONE 2015 - 5th Nirma University International Conference on Engineering*.
- Wamiliana, Wardhana, W., & Kharismaldie, F. (2013). Pembangunan Sistem Operasi Berbasis Linux Menggunakan Metode Linux From Scratch. *Jurnal Komputasi*, 1(2), 30–37.
- Wedianto, A., Sari, H. L., & H, Y. S. (2016). ANALISA PERBANDINGAN METODE FILTER GAUSSIAN, MEAN DAN MEDIAN TERHADAP REDUKSI NOISE. *Jurnal Media Infotama*, 12(1), 21–30.